ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2024, том 88, № 3, с. 449–466

АДАПТАЦИЯ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА: ОПЫТ СТРАН И РЕГИОНОВ

УДК 502.35;504.052

ДОСТИЖЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОГО БАЛАНСА ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ КАК ИНДИКАТОР АДАПТАЦИИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ПРИКАСПИЙСКОМ РЕГИОНЕ

© 2024 г. Г. С. Куст[1, *], В. А. Лобковский[1], О. В. Андреева[1], Д. С. Шкляева[1]

[1]Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: kust@igras.ru*

Поступила в редакцию 06.12.2023 г.
После доработки 08.04.2024 г.
Принята к публикации 16.05.2024 г.

В данной работе рассматривается возможность использования показателей нейтрального баланса деградации земель (НБДЗ) как интегрального индикатора оценки адаптации наземных экосистем к изменениям климата. В качестве объекта исследования рассматриваются примыкающие к Каспию административно-территориальные единицы стран Прикаспийского региона, в пределах которых проводился анализ достижения НБДЗ. Отмечается, что ведущую роль в общей оценке НБДЗ для территории Прикаспия играет динамика продуктивности земель. По результатам расчетов выявлено, что состояние земель на значительной часть территории Прикаспия улучшилось за период 2016–2020 гг. по сравнению с базовым периодом оценки 2001–2015 гг. Это позволяет сделать вывод, что в целом продуктивность земель за этот период является сравнительно высокой, что подтверждает высокий потенциал адаптации к изменениям климата последних лет. Интенсификация эксплуатации пастбищных систем, природных пустынь и пахотных земель приводит к их усиленной деградации несмотря на то, что значительная часть остается стабильной в отношении изменений природной среды и климата. Некоторая часть природных пустынь и пастбищ (вероятно, при снижении антропогенной нагрузки), а также пахотных земель (очевидно, в случае применения приемов устойчивого землепользования) испытывает тенденции к улучшению, однако их доля в регионе невелика. Лесопокрытые земли занимают значительную часть среди улучшенных земель, поэтому можно утверждать, что успешные практики лесопользования здесь имеют приоритет и высокую эффективность в области адаптации. Отмеченные тенденции в динамике земель и их продуктивности хорошо согласуются с фиксируемыми и прогнозируемыми изменениями климата в Прикаспийском регионе. Это позволяет в целом положительно оценить опыт использования в Прикаспийском регион концепции НБДЗ для оценки адаптации к изменению климата.

Ключевые слова: адаптация к изменению климата, устойчивое землепользование, аридные и семиаридные области, Каспийский регион, деградация земель, нейтральный баланс деградации земель

DOI: 10.31857/S2587556624030149 **EDN:** SNGUYC

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

После подписания Парижского соглашения по климату[1] вопросы адаптации к изменениям климата (ИК) вышли в число первостепенных в национальных и региональных повестках дня. Согласно этому документу, “адаптация представляет собой глобальный вызов, стоящий перед всеми в местном, субнациональном, региональном и международном измерениях”, и является “ключевым компонентом долгосрочного глобального реагирования на изменение климата в целях защиты людей, средств к существованию и экосистем”. Цели устойчивого развития ООН, изложенные в Повестке дня на период до 2030 г.,[2] предусматривают: 1) включить меры реагирования на изменение

[1] Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата. https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (дата обращения 01.11.2023).

[2] Система глобальных показателей достижения целей в области устойчивого развития и выполнения задач Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 г. https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%20refinement_Rus.pdf (дата обращения 01.11.2023).

климата в политику, стратегии и планирование на национальном уровне, включая национальный *адаптационный план* (показатель ЦУР 13.2.1); 2) включить вопросы смягчения остроты и ослабления последствий изменения климата, *адаптации к ним* и раннего предупреждения в учебные программы (ЦУР 13.3.1); 3) укрепить возможности для осуществления мер *в области адаптации к климатическим изменениям*, смягчения их последствий и передачи и развития технологии (показатель ЦУР 13.3.2). Решение 15 Конференции Сторон Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием (КБО ООН) рекомендует развивать сотрудничество с соответствующими органами, учрежденными в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата, а также с соответствующими научными и техническими партнерами для подготовки дополнения к национальному плану адаптации, разработке технических руководящих принципов по содействию усилиям по борьбе с опустыниванием/деградацией земель и засухой, достижению нейтрального баланса деградации земель и процессом разработки и реализации национальных планов адаптации в соответствии с Рамочной конвенцией ООН об изменении климата и Парижским соглашением[3]. Совместное заявление президентов Рамочной конвенции ООН по изменениям климата, Конвенции о биологическом разнообразии и КБО ООН, сделанное в октябре 2023 г.,[4] подтверждает необходимость совместных действий по адаптации.

Согласно Национальному стандарту Российской Федерации ГОСТ Р 54139–2010[5], под адаптацией к ИК понимаются “стратегии, направления политики и меры, осуществляемые с целью уменьшения потенциальных неблагоприятных воздействий на здоровье человека, связанных с изменением климата”. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 14090–2019[6] предлагает под адаптацией к изменениям климата понимать: “процесс корректировки под реально существующий климат или прогнозируемое состояние климата и его воздействия”. Национальный план мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 г. утвержден Распоряжением Правительства РФ от 11 марта 2023 г. № 559-р[7]. Однако, ни в одном из этих документов, несмотря на серьезные рекомендации по действиям в области адаптации, не приводится понимание того, как следует оценивать эффективность адаптационных мероприятий. Нет индикаторов адаптации к изменениям климата, основанных на прокси-предложениях ЦУР, и в системе Росстата. По состоянию на начало ноября 2023 г.[8] ни один из восьми показателей ЦУР по климатической цели 13 в России не разрабатывается.

Несмотря на то, что большое число научных работ отечественных и зарубежных ученых посвящено проблеме адаптации к ИК, пока нет прямого ответа на вопрос: как оценить – адаптировался ли тот или иной сектор экономики, территория, хозяйство, конкретное лицо или группа к ИК или нет?

Вместе с тем определенные подходы к ответу на этот вопрос есть. Так, в (Природопользование ..., 2006) рассматривается возможность использования с этой целью средообразующих экосистемных услуг; ряд идей по оценке достижения состояния адаптации на основе экологических подходов (ecosystem-based adaptation) можно найти в международных изданиях[9]. Европейская платформа адаптации к климату Climate-ADAPT[10] рассматривает набор из нескольких десятков возможных индикаторов, лежащий в основе “Стратегии ЕС по адаптации к изменению климата” (2013)[11], в которой представлены основные проблемы и предложения для их решения. Однако эти индикаторы скорее являются показателями собственно изменений климата, а не адаптации к ним. Многие международные организации развития (UNDP, World Bank, FAO) рассматривают проблему адаптации и соответствующих индикаторов через призму сообществ (community-based adaptation), оценивая изменения в их социально-экономиче-

[3] UNCCD Decision 20/COP.15 para 4. https://www.unccd.int/official-documents/cop-15-abidjan-cote-divoire-2022/documents/20cop15 (дата обращения 01.11.2023).

[4] UNFCCC documents: Joint Statement of the Presidents. Publication date 09 Nov 2023. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/joint_statement_unccd_cop15_cbd_cop15_unfccc_cop27.pdf.

[5] ГОСТ Р 54139–2010 Национальный стандарт РФ. Экологический менеджмент. Руководство по применению организационных мер безопасности и рисков. Изменение климата. https://base.garant.ru/70350532/ (дата обращения 01.11.2023).

[6] ГОСТ Р ИСО 14090–2019 Национальный стандарт РФ. Адаптация к изменениям климата. Принципы, требования и руководящие указания (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 сентября 2019 г. № 674-ст). https://base.garant.ru/400227239/ (дата обращения 01.11.2023).

[7] Распоряжение Правительства РФ от 11.03.2023 № 559-р “Об утверждении национального плана мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года”. http://static.government.ru/media/files/DzVPGlI7JgT7QYRoogphpW69KKQREGTB.pdf (дата обращения 01.11.2023).

[8] Статус разработки показателей ЦУР. Федеральная служба государственной статистики. https://rosstat.gov.ru/sdg/reporting-status (дата обращения 01.11.2023).

[9] Рекомендация, принятая вспомогательным органом по научным, техническим и технологическим консультациям. 22/7. Биоразнообразие и изменение климата: подходы с позиций экосистем к адаптации к изменению климата и уменьшению опасности стихийных бедствий. https://www.cbd.int/doc/recommendations/sbstta-22/sbstta-22-rec-07-ru.pdf (дата обращения 01.11.2023).

[10] Indicators in Climate-ADAPT. https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/knowledge/c-a-indicators (дата обращения 01.11.2023).

[11] EU Adaptation Strategy. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-climate-change/eu-adaptation-strategy_en (дата обращения 01.11.2023).

ской уязвимости к серии воздействий и адаптационную емкость[12]. Определенные косвенные указания на использование серии индикаторов состояния почвенных систем для целей адаптации к ИК отражены в Национальных докладах (Национальный ..., 2018; Национальный ..., 2019). Ряд возможных подходов описаны также во втором и третьем оценочных докладах об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации[13]. В качестве оценки эффективности антропогенной адаптации экосистем предлагалось использовать значение изменения общего запаса углерода, который не должен быть отрицательным в расчете на единицу площади (Романовская, 2018). Однако и этот индикатор, при его безусловной важности, в значительной степени отражает не столько адаптационные аспекты, сколько митигационные, указывая на сохранение баланса в запасах углерода. Ближе всех к пониманию проблемы индикаторов адаптации к изменениям климата, на наш взгляд, подошли (Pearce-Higgins et al., 2022), предлагая для отслеживания прогресса в адаптации к изменению климата рассматривать структуру с тремя типами экологических индикаторов, основанных на процессах: показатели исходных условий (inputs), действий и процессов (activities) и непосредственных результатов (outputs), и двумя типами индикаторов, основанных на результатах оценки отдаленных результатов (outcomes) и воздействий (impacts). Авторы подчеркивают важность динамической оценки, когда устанавливаются новые цели адаптации и/или когда внешние воздействия контролируются и оцениваются. Эти подходы позволили предложить достаточно стройную систему для оценки адаптации к ИК охраняемых природных территорий, состоящую из двух блоков: (а) индикаторы для оценки защиты и улучшения охраняемых территорий и других местообитаний, и (б) индикаторы для отслеживания восстановления деградированных экосистем, а также расширения местообитаний.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

В данной работе мы поставили целью для поиска и подбора интегрального индикатора адаптации к изменениям климата наземных экосистем рассмотреть возможность использования подходов концепции нейтрального баланса деградации земель (НБДЗ. Land Degradation Neutrality, LDN). Развитием этой концепции авторы занимаются с момента разработки определения НБДЗ, которое было утверждено на 12 Конференции сторон КБО ООН[14] – это такое “состояние, при котором объем и количество земельных ресурсов, необходимых для поддержания экосистемных функций и услуг, и усиления продовольственной безопасности, остаются стабильными или же увеличиваются в конкретно определенных временны́х и пространственных масштабах и экосистемах”. Общая идея, заложенная в концепцию НБДЗ, заключается в том, чтобы не допустить увеличения количества ухудшенных земель по сравнению с выбранным базовым периодом в пределах конкретных территорий. Нетрудно заметить, что понятие НБДЗ включает в себя практически все из рекомендованных многими авторами подходов и требований к индикаторам адаптации к ИК: отражать не только фактическое состояние, но и динамику происходящих изменений, быть “основанным на экосистемах”, учитывать экосистемные услуги, социально-экономические требования и обстоятельства, и одновременно – интегрировать серию возможных индикаторов, как глобального уровня, так и специфических для конкретных территорий, отражающих их природные и социально-экономические особенности. Напомним, что так называемые глобальные прокси-индикаторы НБДЗ включают в себя: динамику наземного покрова, динамику продуктивности земель, динамику запасов почвенного органического углерода. Интегральный учет этих индикаторов проводится по принципу всеобщего охвата (one-out-all-out) и реализуется в итоге в индикаторе ЦУР 15.3.1 – доля деградированных земель от общей площади территории. На региональном, национальном и местном уровнях допускается использовать дополнительные индикаторы или

[12] Climate Change Adaptation in Africa. UNDP Synthesis of Experiences and Recommendations Africa. 2018. https://www.thegef.org/sites/default/files/publications/CCA-Africa-Final.pdf (дата обращения 01.11.2023); Climate change adaptation and economic transformation in Sub-Saharan Africa. 2021. https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/34f98cfe-b27b-58ad-a0cb-99568577e730/content (дата обращения 01.11.2023); Strategy on climate change 2022–2031. FAO, 2022. https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/07/cc2274en.pdf (дата обращения 01.11.2023); Шмелева И.А. Международный опыт в вопросах управления адаптацией к изменениям климата. https://climatescience.ru/articles/5e9ef5ddc810400019470e50 (дата обращения 01.11.2023); Шмелева И.А. Международный опыт в вопросах управления адаптацией к изменениям климата. https://climatescience.ru/articles/5e9ef5ddc810400019470e50 (дата обращения 01.11.2023).

[13] Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. https://cc.voeikovmgo.ru/ru/?option=com_content&view=article&id=121 (дата обращения 01.11.2023); Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. https://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/doklady/14-dokumenty/1992-tretij-otsenochnyj-doklad-rosgidrometa-ob-izmeneniyakh-klimata-i-ikh-posledstviyakh-na-territorii-rossijskoj-federatsii-2022-g (дата обращения 01.11.2023).

[14] UNCCD, 2015. Integration of the Sustainable Development Goals and targets into the implementation of the United Nations Convention to Combat Desertification and the report of the Intergovernmental Working Group on Land Degradation Neutrality. ICCD/COP(12)/4. https://www.unccd.int/sites/default/files/sessions/documents/ICCD_COP12_4/4eng.pdf (дата обращения 01.11.2023).

индикаторы-аналоги, с учетом особенностей конкретной территории (Kust et al., 2017; Orr et al., 2017; UNCCD, 2015[15]).

Несмотря на то, что в применении концепции НБДЗ для оценки деградации земель и опустынивания в Российской Федерации и сопредельных странах есть ряд проблем (Беляева и др., 2020; Kust et al., 2018), в серии недавних работ (Andreeva et al., 2021, 2022) мы показали, что при определенных ограничениях состояние НБДЗ может быть успешно использовано как критерий отнесения систем землепользования к "устойчивым". Были выделены классы и типы землепользования, определено понятие "моделей устойчивого землепользования" и способы визуализации этих семантических моделей УЗП. В другом исследовании (Sanz et al., 2017) мы показали, что практики УЗП, будучи правильно подобранными, играют решающую роль не только в достижении НБДЗ, но и в адаптационных процессах. С учетом успешности результатов этих исследований, выразившихся в описании иерархии моделей и практик землепользования для определенных территорий и отраслей, схожести содержательного соответствия понятий устойчивого землепользования и адаптации к изменениям климата, а также подходов к их оценке, близости мероприятий по адаптации и/или повышению и поддержанию устойчивости землепользования в основных секторах экономики, мы решили сформулировать *рабочую гипотезу о том, что достижение состояния НБДЗ может служить надежным критерием адаптации наземных экосистем к изменениям климата*. Проверка этой гипотезы на примере Прикаспийского региона определила главные задачи работы: 1) исследовать динамику достижения НБДЗ в ключевых областях прикаспийских государств; 2) в предварительном порядке выявить возможные ограничения на использование НБДЗ и его индикаторов для оценки адаптации к ИК в Прикаспийском регионе; 3) сравнить прогнозируемые последствия изменений климата в исследуемом регионе с наблюдаемой динамикой глобальных индикаторов деградации земель.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Проводилось обследование административно-территориальных единиц стран, имеющих выход к Каспийскому морю – в Российской Федерации: Республики Дагестан и Калмыкия, Астраханская и Волгоградская области; в Республике Казахстан: Западно-Казахстанская, Атырауская и Мангистауская области; в Туркменистане: Балканский велаят; в Исламской Республике Иран: провинции Гилян, Мазендеран и Голестан; в Азербайджанской Республике: экономические районы Ленкорань-Астаринский, Бакинский, Губа-Хачмазский, Абшерон-Хызынский, Ширван-Сальянский.

Прикаспийский регион неоднороден по своим климатическим и ландшафтным характеристикам, поэтому адаптационный потенциал территорий различается: мягкий, теплый и влажный климат характерен для иранской части, более сухие условия отмечаются на побережье Каспия и в предгорьях Кавказа на территории Азербайджана и российского Дагестана, экстрааридные пустынные условия характерны для Балканского велаята Туркменистана, относительно холодные зимы в сочетании с полупустынными условиями отмечаются в Северной части Прикаспия в России и Казахстане, за исключением территорий дельт Волги и других рек. Каспийское море играет важную роль в атмосферных процессах, региональном водном балансе и микроклимате региона. Климатические явления здесь связаны с Североатлантической осцилляцией (колебаниями атмосферного давления воздуха), влияющей на температуру, влажность и зимние ураганы (Семенов, Черенкова, 2018; Черенкова и др., 2020).

Оценку деградации земель и достижения НБДЗ проводили с помощью методологических подходов, описанных ранее (Andreeva and Kust, 2020; Kust et al., 2018; Orr et al., 2017; Sims et al., 2021). Для расчетов и картографических построений использовали рекомендованный со стороны КБО ООН ГИС-модуль Trends.Earth (версия плагина 1.0.10), реализованный в приложении Quantum-GIS (версия Firenze 3.28.11)[16]. В соответствии с этой методологии, глобальный индикатор деградации земель ЦУР 15.3.1 оценивается на основе сравнения трендов за рассматриваемый период (градации "ухудшение", "стабильность", "улучшение") по значениям трех субиндикаторов – динамики наземного покрова, продуктивности земель и запасов почвенного органического углерода. При любом уровне оценки важным является использование принципа "полного охвата" (one out–all out), т.е. негативное значение динамики любого из принятых индикаторов указывает на деградацию земель за рассматриваемый временной период. Такой подход позволяет получать информацию о деградации земель практически для любого участка земной поверхности в динамике, в срав-

[15] UNCCD, 2015. Integration of the Sustainable Development Goals and targets into the implementation of the United Nations Convention to Combat Desertification and the report of the Intergovernmental Working Group on Land Degradation Neutrality. ICCD/COP(12)/4. https://www.unccd.int/sites/default/files/sessions/documents/ICCD_COP12_4/4eng.pdf (дата обращения 01.11.2023).

[16] Trends.Earth. A new tool to assess the health of the land that supports us. https://www.conservation.org/about/trends-earth (дата обращения 01.11.2023).

нении с принятым исходным состоянием – базовой линией. Trends.Earth на основании ряда встроенных алгоритмов позволяет в полуавтоматическом режиме рассчитывать эти субиндикаторы на основе использования международных баз данных ESA-CCI–LC210[17], SoilGrids[18] и материалов дистанционного зондирования Земли из космоса. Подробное описание подбора необходимых данных, составления временных рядов для оценки и способов обработки информации содержится в (Sims et al., 2021) и описании модуля Trends.Earth[19].

Для целей нашего исследования особый интерес представляет вычислительный продукт (набор методов и алгоритмов) Объединенного исследовательского центра (JRC) Европейской комиссии, известный под названием "Динамика продуктивности земель" (LPD, Land Productivity Dynamics) как часть Trends.Earth. Одним из самых надежных способов оценки продуктивности земель считаются вегетационные индексы, получаемые на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса[20]. Одним из таких индексов является нормализованный относительный индекс растительности (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), использующийся в расчетном модуле Trends.Earth. NDVI представляет собой частное от деления разности отраженного инфракрасного излучения и излучения красного диапазона видимого спектра на их сумму (Phillips et al., 2008). LPD на глобальном уровне классифицирует наблюдения за продуктивностью растений, указывая на их уровень и тенденции изменений времени. Trends.Earth позволяет рассчитывать эти классы на основе наборов временных данных, включая индексы растительности, представляемые на базе MODIS[21] (MOD31Q1, MYD13Q1, 250 м в пикселе, 16-дневный период интеграции с 2000 г.) и Copernicus Global Land Service NDVI[22] (1 км годовые глобальные композиты, с 1998 г.). MOD13Q1 интегрирует наблюдения NDVI (и EVI1) с разрешением 250 м в пикселе за 16-дневные периоды и строит годовые композиты по периодам с наибольшими значениями NDVI, наименьшим углом обзора и самой низкой облачностью в пределах каждого пиксела для выбранного периода времени. LPD[23] предполагает, что такой период для расчета чистой первичной продуктивности (Net Primary Productivity, NPP) наилучшим способом описывается подмножеством наблюдений, сделанных в период ежегодной максимальной вегетации каждый год. С этой целью рассчитывается интеграл продуктивности в течение вегетационного периода. Для тропических регионов или районов со слабым растительным покровом (пустыни, горы, пустоши) сезоны для оценки в каждый конкретный год определяются на основе ожидаемого периода наибольшей биомассы, периода наименьшей облачности или произвольного периода, выбранного так, чтобы он подтверждался полевыми данными. Обычно такой период приходится на каждый год для конкретных мест примерно в одно и то же время.

В целях отработки рабочей гипотезы важное значение имел выбор специфических подходов к анализу продуктивности. В нашей работе для анализа динамики продуктивности Прикаспийского региона мы впервые применили дифференцированную оценку продуктивности, реализованную в Trends.Earth и основанную на совокупном учете трех показателей (субиндикаторов) продуктивности: тенденции, уровня (состояния) и эффективности (проявления) продуктивности (productivity trend, productivity state и productivity performance). Алгоритм совместного использования этих показателей представлен в табл. 1. Однако индивидуальные картосхемы, полученные для отдельных показателей, также представляют важную информацию для оценки адаптационной способности земель исследуемого региона. Дело в том, что если по индикатору NDVI можно рассчитать площадь территорий, где происходит увеличение или снижение продуктивности, а также площадь земель, на которых не было выявлено изменений продуктивности за исследуемый период, то при анализе деградации земель в засушливых областях расчеты на основе NDVI могут содержать определенные неточности в силу того, что растительность в аридных областях обладает разреженным характером. Более того, по данному индикатору невозможно получение данных о состоянии земель на территориях, где растительность отсутствует полностью, особенно при использовании данных ДЗЗ с низким пространственным разрешением (Hu et al., 2020).

Для определения "тенденции" в модуле Trends.Earth используется метод линейной ре-

[17] European Space Agency climate change initiative land cover – Проект о наземном покрове Инициативы по изменению климата Европейского космического агентства. https://esa-landcover-cci.org/ (дата обращения 01.11.2023).

[18] SoilGrids – система глобального цифрового картографирования почв. https://soilgrids.org/(дата обращения 01.11.2023).

[19] Trends.Earth. A new tool to assess the health of the land that supports us. https://www.conservation.org/about/trends-earth (дата обращения 01.11.2023).

[20] SDG indicator metadata for indicator SDG 15.3.1. Harmonized metadata template – format version 1.1. 2022. https://landportal.org/library/resources/metadata-sdgs-indicator-1531 (дата обращения 01.11.2023).

[21] MODIS Vegetation Index Products. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod13.php (дата обращения 01.11.2023).

[22] Copernicus Global Land Service NDVI. https://land.copernicus.eu/global/products/ndvi (дата обращения 01.11.2023).

[23] WAD – World Atlas of Desertification. https://wad.jrc.ec.europa.eu/landproductivity (дата обращения 01.11.2023).

Таблица 1. Классы динамики продуктивности на основании интегральной оценки трех субиндикаторов в приложении Trends.Earth

Показатели продуктивности земель			Индикатор динамики продуктивности земель (5 классов)	Итоговый индикатор динамики продуктивности земель (3 класса)
Тенденция	Уровень	Эффективность		
Улучшение	Улучшение	Стабильность	Улучшение	Улучшение
		Ухудшение		
	Стабильность	Стабильность		
		Ухудшение		
	Ухудшение	Стабильность		
		Ухудшение	Умеренное ухудшение	Ухудшение
Стабильность	Улучшение	Стабильность	Стабильность	Стабильность
		Ухудшение		
	Стабильность	Стабильность		
		Ухудшение	Угнетение (риск)	
	Ухудшение	Стабильность	Умеренное ухудшение	Ухудшение
		Ухудшение	Ухудшение	
Ухудшение	Улучшение	Стабильность		
		Ухудшение		
	Стабильность	Стабильность		
		Ухудшение		
	Ухудшение	Стабильность		
		Ухудшение		

грессии на уровне каждого пиксела. Идентификация трендов происходит на основе среднегодовых значений NDVI, полученных путем усреднения данных NDVI с интервалом в 16 дней. Если в пикселе в заданный временной промежуток значения NDVI возрастают, то в пределах данного пиксела состояние земель улучшается. Напротив, если можно заключить, что в конкретном пикселе в течение определенного промежутка времени среднегодовые значения NDVI снижаются, считается, что в границах этого пиксела происходит ухудшение состояния земель[24]. Иными словами, показатель тенденции продуктивности предполагает анализ временных рядов NDVI с помощью линейной регрессии.

Показатель “эффективности” продуктивности предполагает анализ NDVI не во временном, а в пространственном масштабе. При определении данного показателя продуктивность на заданной территории сравнивается с продуктивностью территорий, схожих по растительному, наземному покровам, и биоклиматическим характеристикам. Для этого в модуле Trends.Earth используются данные SoilGrids[25] о характере почвенного покрова и карты наземного покрова ESA CCI LC[26]. Усредненные значения NDVI в пределах каждого пиксела за анализируемый промежуток времени сравнивается с продуктивностью схожих по природным характеристикам участков, для которых рассчитывается максимальное значение NDVI – 90-й процентиль частотного распределения значений NDVI в пределах участка, выбранного для сравнения (или значение NDVI, выше которого находятся 10% от всех значений NDVI в пределах участка). По отношению NDVI анализируемого пиксела и максимального значения NDVI (90-го процентиля) в пределах выбранного участка судят о продуктивности: если полученное соотношение меньше 0.5, то земли в пределах рассматриваемого пиксела считаются ухудшенными.

Наконец, с помощью субиндикатора “уровня” продуктивности возможно выявление недавних изменений в значениях NDVI по сравнению с базовым периодом. На основе гистограммы распределения частот встречаемости среднегодовых значений NDVI базового

[24] Trends.Earth. A new tool to assess the health of the land that supports us. https://www.conservation.org/about/trends-earth (дата обращения 01.11.2023).

[25] SoilGrids. https://soilgrids.org/ (дата обращения 01.11.2023).

[26] European Space Agency climate change initiative land cover – Проект о наземном покрове Инициативы по изменению климата Европейского космического агентства (https://esa-landcover-cci.org/) (дата обращения 01.11.2023).

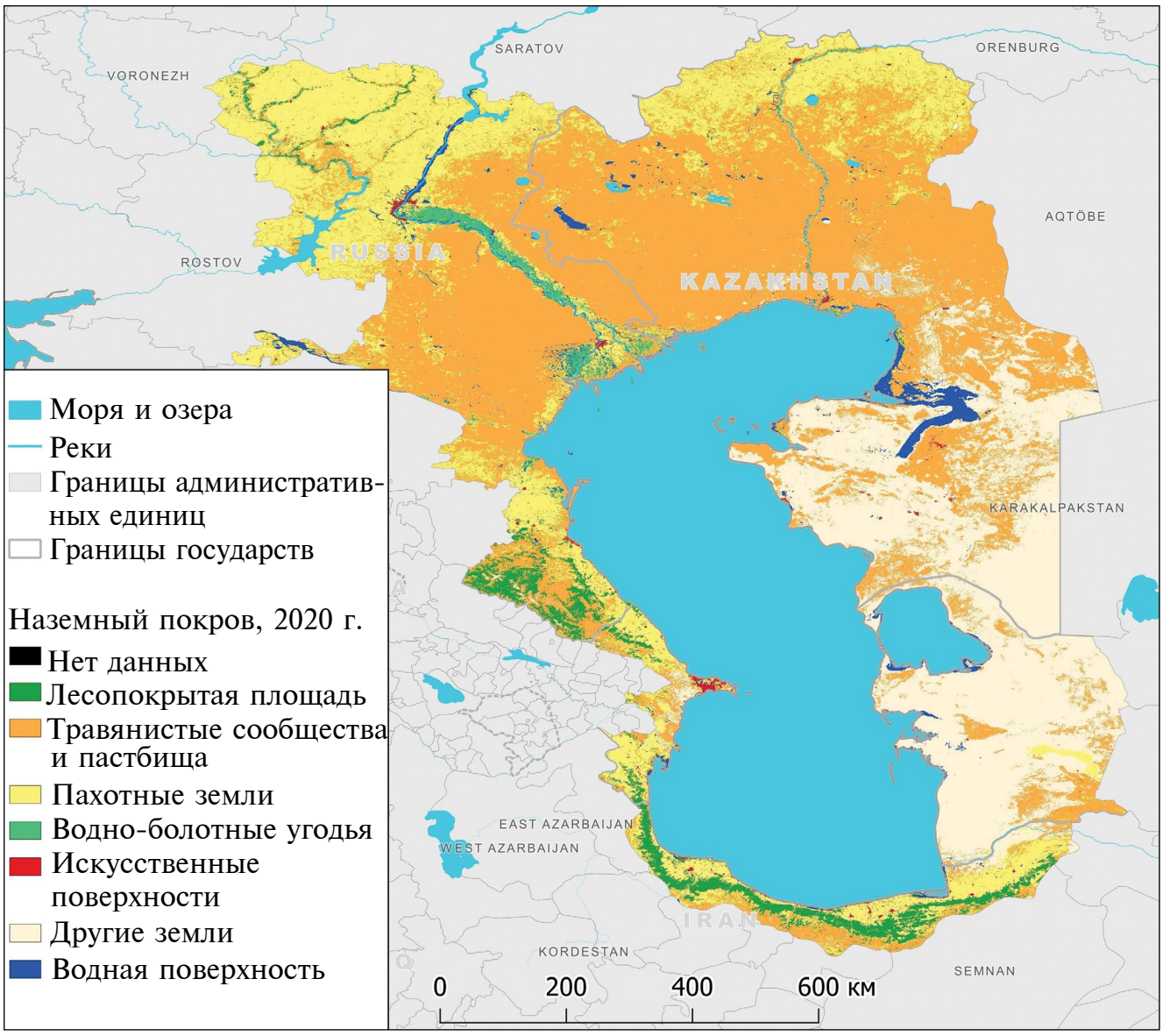

Рис. 1. Наземный покров исследуемого региона по состоянию на 2020 г.

периода и мониторингового периода для каждого пиксела определяется дециль (от 1 до 10), к которому это среднее значение относится. Разность между номером класса, присвоенного мониторинговому периоду, и номером класса, присвоенного базовому периоду, позволяет судить об "уровне" продуктивности: если разность между номерами классов превышает две единицы, то состояние земель в пределах данного пиксела считается улучшенным. Если разность между классами меньше двух, то, скорее всего, в границах пиксела состояние земель ухудшилось. Разность от –1 до 1 означает отсутствие изменений в состоянии земель. Иначе говоря, чем меньше среднее значение NDVI периода 2016–2020 гг. по сравнению со значениями NDVI базового периода (2001–2015 гг.), тем больше вероятность деградации, и наоборот.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика достижения НБДЗ в Прикаспийском регионе

Наземный покров исследуемой территории (рис. 1) почти наполовину представлен лугами и пастбищами, около 20% занимают пахотные земли, расположенные в основном в российской и казахстанской частях. Пустынные области (в основном классифицируемые как "другие земли") занимают более четверти площади региона (рис. 2). Лесные земли занимают в основном предгорья Кавказа на западе и склоны Эльбурса – на юге региона.

Общая оценка деградации земель и достижения НБДЗ в исследуемом регионе Прикаспия приведена нами в работе (Kust et al., 2021). Кратко напомним, что при сравнении современно-

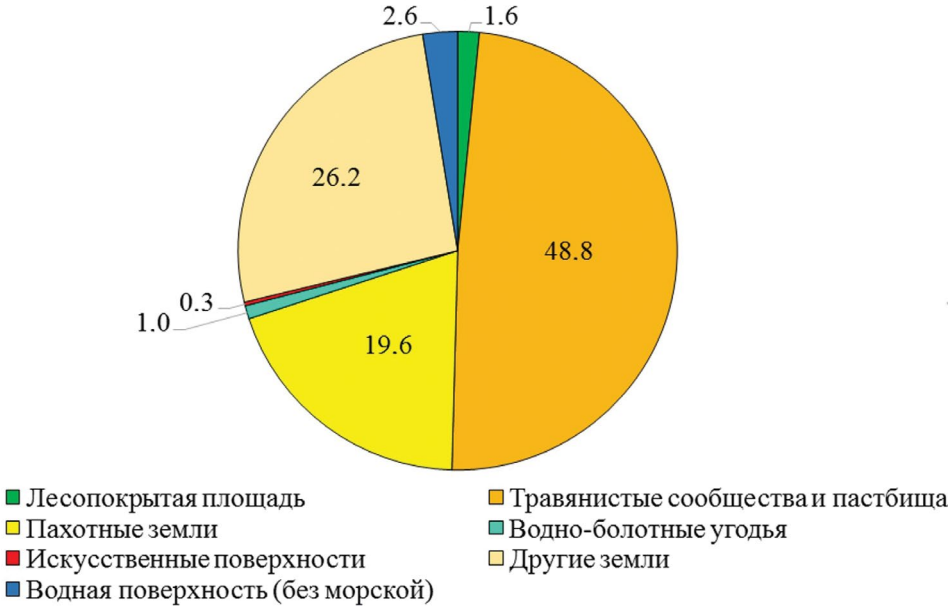

Рис. 2. Типы наземного покрова исследуемой территории, % от общей площади.

го состояния земель (усредненные данные за 2016–2020 гг.) с базовым периодом (усредненные данные за 2001–2015 гг.), минимальные доли деградированных земель отмечены в рассматриваемых провинциях Ирана (5.9% от площади всех земель), максимальные – в исследуемых областях Казахстана (до 52.7%). Для земель Туркменистана, России и Азербайджана этот показатель имеет значения 9.5, 23.7 и 33.2% соответственно. Индекс НБДЗ (разница между долями улучшенных и ухудшенных земель) (Andreeva, Kust, 2020) с разбивкой по административно-территориальным единицам за рассматриваемый период на рис. 3 показывает, что в наибольшей степени деградации земель подвержена территория Казахстана, а также предгорные районы Большого Кавказа и Кура-Араксинской низменности, что в основном соответствует Северному и Северо-Восточному Прикаспию (индекс НБДЗ от –59.7 до –44.7%). Деградации земель в умеренной степени подвержены равнинные и низинные территории России, Восточный Кавказ и Апшеронский полуостров, что соответствует Северо-Западному и Западному Прикаспию (индекс НБДЗ составляет от –30.4 до –16.8%). Наиболее благоприятное состояние земель наблюдается на восточных склонах Талышских гор, в предгорных районах и на северных склонах Эльбурса, а также в Балканском велаяте или в Южном и Юго-Восточном Прикаспии (индекс НБДЗ от –5.6 до 11.9%).

Динамика продуктивности земель в Прикаспийском регионе

Расчеты “тенденции” продуктивности земель, полученные методами линейной регрессии для каждого пиксела, показывают (рис. 4), что в северной и центральной частях Прикаспия на равнинных пастбищных и пахотных угодьях доминируют отрицательные (указывающие на деградацию земель) тенденции продуктивности, за исключением затопляемых маршевых ландшафтов в районе залива Мертвый Култук. В южной части преобладают положительные тренды, преимущественно связанные с возрастанием лесистости горных склонов и улучшением земледельческих практик и управления землепользованием в иранской и азербайджанской части региона. В туркменской части наблюдаемые положительные тренды NDVI связаны с одной стороны – с закреплением песков и солончаков в районе залива Туркменбаши, а с другой – с отступанием береговой линии мелководного залива, зарастанием новой суши влаголюбивыми галофитами.

Результаты расчета субиндикатора “эффективности” продуктивности (рис. 5), наоборот, демонстрируют негативное состояние продуктивности, несмотря на относительное “позеленение” ряда ландшафтов, отмечаемое на рис. 4. Среди таких участков в основном отмечаются приуроченные к обсыхающим засоленным понижениям морских маршей и коллекторно-сбросных озер, а также некоторые участки деградированных предгорных пастбищ, зарастающих сорной растительностью, ряд пустынных пастбищ, испытывающих дополнительную техногенную нагрузку.

На карте-схеме, отражающей состояние “уровня” продуктивности (рис. 6), хорошо прослеживаются недавние изменения в значениях NDVI по сравнению с базовым периодом. По

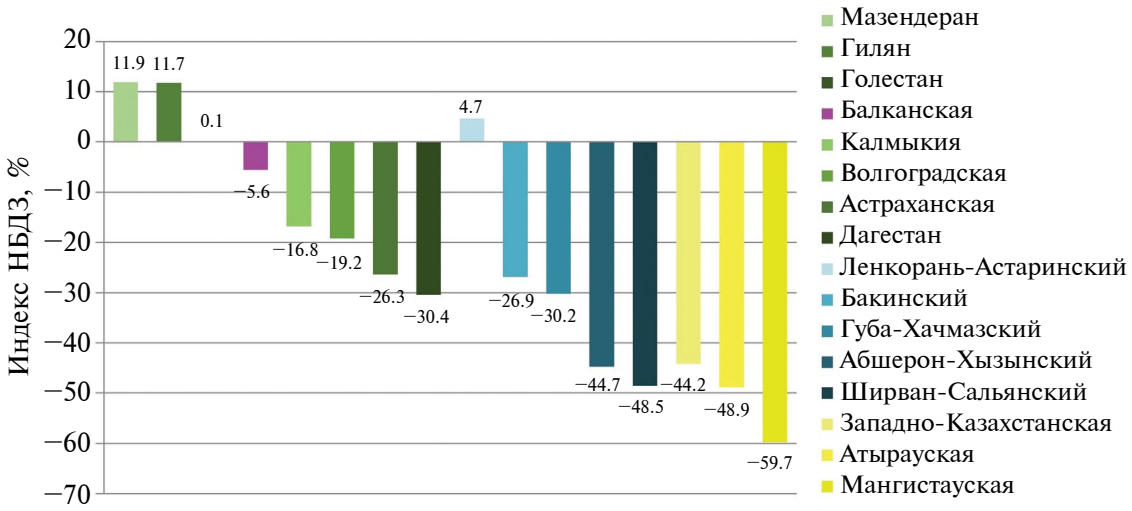

Рис. 3. Ранжирование административно-территориальных единиц первого порядка в странах Прикаспийского региона по индексу НБДЗ, рассчитанному за период 2016–2020 гг. (базовый период 2001–2015 гг.).

этому показателю значительную часть территории Прикаспия следует характеризовать положительно. Широкое распространение земель, состояние которых улучшилось за 2016–2020 гг. по сравнению с базовой линией, позволяет сделать следующий вывод: несмотря на наметившиеся тренды снижения продуктивности земель за тот же период, показанные на рис. 4, продуктивность в целом в регионе была сравнительно высокой, что подтверждает высокий потенциал адаптации к изменениям климата последних лет, в том числе и в областях, где "эффективность" продуктивности отличается ухудшением.

Интегральная картина, основанная на совокупном учете трех индикаторов продуктивности (согласно алгоритму, приведенному в табл. 1), позволяет охарактеризовать потенциал адаптации земель к изменениям природной среды и климата более детально, с учетом имеющихся рисков, характерных для определенного расчетного периода, и продемонстрировать картографическое распределение соответствующих классов динамики продуктивности (рис. 7).

Рис. 4. "Тенденции" продуктивности земель: усредненные данные за период 2016–2020 гг.

На основании картографического анализа интегральной карты-схемы, представленной на рис. 7, на фоне общей относительной стабильности региона к изменениям природной среды и климата (61.7% анализируемой территории), деградационные тренды преобладают и охватывают в общей сложности 29.2% площади региона, умеренно ухудшенные и угнетенные – по 3.4%. Незначительные участки улучшения, расположенные в основном в южной части Прикаспия, занимают всего около 1.9%. Для 0.4% анализируемой территории недостаточно данных для достоверного анализа трендов. Вместе с тем, более детальный анализ переходов земель в пределах выделенных интегральных классов динамики продуктивности показывает, что поддержание и изменение адаптационного потенциала и рисков деградационных изменений в пределах этих классов происходит неравномерно. Так, даже в пределах относительно стабильных по продуктивности экосистем наиболее яркие тенденции проявляются в виде перехода травянистых систем в пахотные земли (более 1.2% земель этого класса продуктивности), пустынных систем – в пастбищные угодья (более 0.3%). Для деградированных земель наиболее характерны переходы травянистых систем в пашню (более 10% земель этого класса), и пустынных систем – в деградированные пастбища (около 8.5%). Те же тенденции характерны для умеренно-ухудшенных земель – 6% земель, перешедших из травянистых систем в пахотные.

Рис. 5. "Эффективность" продуктивности земель: сравнение усредненных значений NDVI по состоянию за период 2016–2020 гг. со значениями NDVI территорий, аналогичных по природным характеристикам.

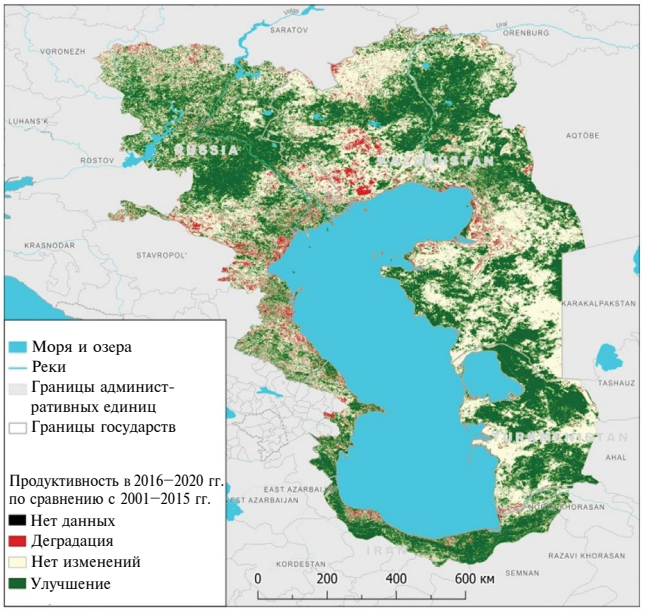

Рис. 6. "Уровень" продуктивности земель: усредненные данные за период 2016–2020 гг. по сравнению с базовым периодом (2001–2015 гг.).

Среди угнетенных и улучшенных земель не отмечается значимых долей переходов земель из одного типа в другой.

Интересную информацию представляет также и анализ состава земель разных классов продуктивности (табл. 2). В составе улучшенных земель преобладают природные пустыни, лесные, пахотные земли и травянистые сообщества. Категория стабильных земель представлена в основном пастбищами, природными пустынями и пахотными землями. В составе угнетенных земель абсолютно доминируют природные пустыни, а также пастбищные земли. Умеренно ухудшенные и ухудшенные более чем наполовину, представлены пастбищами. Однако категории, занимающие в них второе по доле место, различаются: среди умеренно ухудшенных – это пахотные земли, а среди ухудшенных – природные пустыни.

Предварительные результаты сравнения динамики продуктивности земель и ожидаемых последствий изменений климата

Анализ фиксируемых и прогнозируемых последствий изменений климата в странах Прикаспийского региона[27], достаточно хорошо изученных и представленных в научной литературе (Черенкова, Сидорова, 2022; Javari, 2016; Kuzucuoğlu and Leroy, 2023; Limareva et al., 2017; Molavi-Arbshahi et al., 2015; Rabbaniha, 2013; Samant and Prange, 2023; Schiemann et al., 2008; Vahdati et al., 2019; Zhang et al., 2019), показывает следующие основные тенденции:

а) при зафиксированном росте температур приземного слоя атмосферы в регионе от 0.3 до 1.5°C за последние 50 лет, согласно существующим моделям (Akbari et al., 2020; Behzadi et al., 2022), он происходит быстрее, чем во мно-

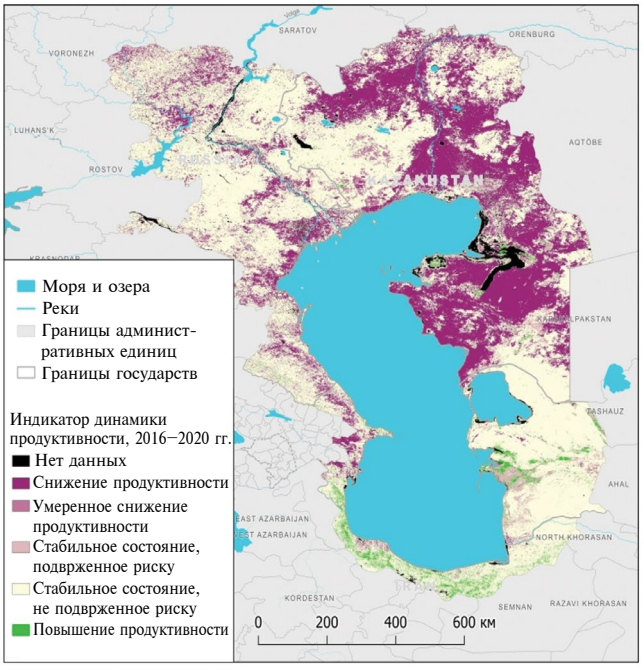

Рис. 7. Интегральная оценка динамики продуктивности земель за период 2016–2020 гг. по сравнению с базовым периодом (2001–2015 гг.).

27 Climate Risk Country Profiles. https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country-profiles (дата обращения 01.11.2023).

Таблица 2. Состав земель по классам продуктивности (без учета пикселов, для которых нет достоверных данных по NDVI). Верхняя строка – км^2, нижняя – % от общей площади соответствующей категории по динамике продуктивности

Тип наземного покрова	Класс земель по динамике продуктивности					
	Улучшенные	Стабильные	Угнетенные	Умеренно ухудшенные	Ухудшенные	Всего
Лесопокрытая площадь	3774.79	22853.43	253.21	882.47	2509.44	30273.34
	22.26	4.14	0.83	2.90	0.96	3.39
Травянистые сообщества и продуктивные пастбища	3234.24	253869.27	8331.72	16665.75	147845.85	429946.83
	19.07	45.95	27.33	54.75	56.50	48.20
Пахотные земли	3814.62	131988.36	641.85	10914.39	42267.20	189626.42
	22.50	23.89	2.11	35.85	16.15	21.26
Водно-болотные угодья	62.78	4687.36	49.37	425.83	2371.30	7596.64
	0.37	0.85	0.16	1.40	0.91	0.85
Искусственные поверхности	161.41	2056.83	133.98	260.65	616.02	3228.89
	0.95	0.37	0.44	0.86	0.24	0.36
Другие земли (в основном пустыни и солончаки)	5702.51	134722.17	20593.31	1155.81	65315.01	227488.81
	33.63	24.39	67.54	3.80	24.96	25.50
Водные объекты	205.46	2301.14	487.32	136.58	771.82	3902.32
	1.21	0.42	1.60	0.45	0.29	0.44
Итого	16955.80	552478.57	30490.77	30441.49	261696.65	892063.28
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

гих других регионах мира, с потенциальным повышением до 5°С и выше к 90-м годам XXI в.;

б) тренды в изменении количества осадков не столь явные, и в отдельных случаях даже отмечается их незначительное возрастание (северо-западная и западная часть) или наоборот, снижение (юго-западная часть). Но это происходит на фоне сокращения общего количества дней с осадками и увеличения засушливого периода практически во всем регионе Прикаспия. Однако такие оценки носят самый общий характер, и для более локальных объектов есть наблюдения иного, часто прямо противоположного характера (Сапанов, 2010; Титкова и др., 2022);

в) ожидается учащение серьезных и продолжительных засух, усиливающих опустынивание, пыльные и песчаные бури. Более детальные исследования показывают, что при отсутствии

Рис. 8. Основные последствия изменений климата в Прикаспийском регионе.
Составлено по: European Space Agency climate change initiative land cover – Проект о наземном покрове Инициативы по изменению климата Европейского космического агентства. https://esa-landcover-cci.org/ (дата обращения 01.11.2023).

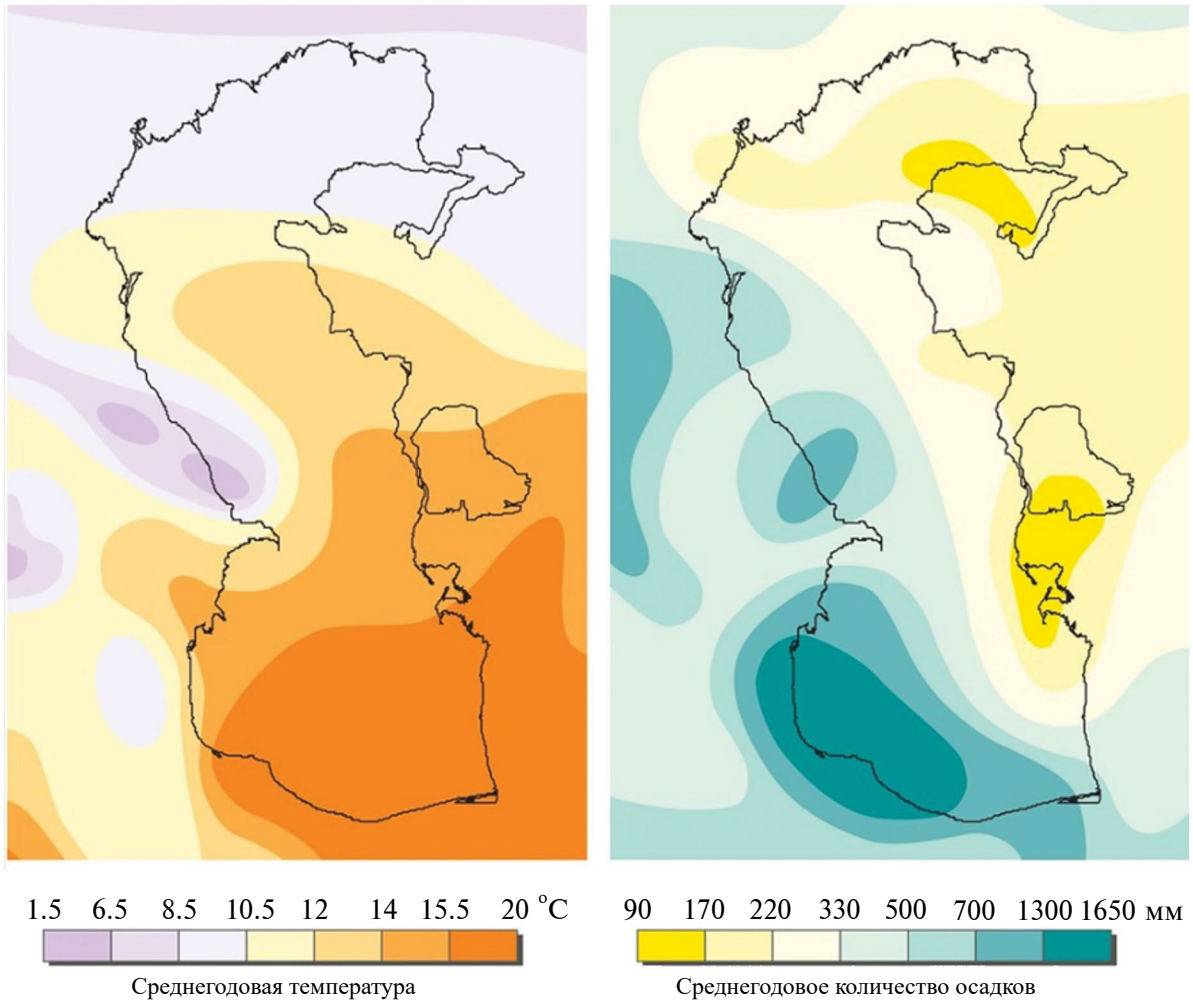

Рис. 9. Температура и осадки в Прикаспийском регионе.
Составлено по: European Space Agency climate change initiative land cover – Проект о наземном покрове Инициативы по изменению климата Европейского космического агентства. https://esa-landcover-cci.org/ (дата обращения 01.11.2023).

статистически значимых трендов аридизации за более, чем вековой период, например, в российской части наблюдаются длительные внутривековые периоды усиления и ослабления аридизации, которые характеризуются существенными различиями частоты и интенсивности весенне-летних засух (Титкова, 2003). Показано, что в сухой период частота засух возрастала в 1.5 раза при незначительном росте интенсивности засух (Титкова, Золотокрылин, 2022). В современный сухой период, который наблюдается с начала XXI в., весенне-летние засухи стали раньше возникать в восточных областях юга Европейской России (Золотокрылин и др., 2020);

г) в свою очередь, сокращение доступных земельных ресурсов ожидаемо увеличит нагрузку и на без того сильно деградированные пастбища;

д) падение уровня Каспийского моря, особенно заметное в северной части моря, отрицательно сказывается в форме обнажения мелководий и превращения их в солончаки, несмотря на кратковременное зарастание галофитами;

е) наблюдается отток населения из прибрежной зоны, что с одной стороны, снижает нагрузку на природные, особенно пустынные сообщества, а с другой стороны – приводит к вовлечению их в пастбищное использование, несмотря на низкую продуктивность и относительную хрупкость.

В наиболее полном виде в картографической форме ожидаемые изменения отражены на интегральной карте, приведенной в международном обзоре “Vital Caspian Graphics 2 – Возможности, стремления, вызовы”[28] (рис. 8).

Сравнение полученных нами результатов по индикаторам НБДЗ с этими данными, а также с основными климатическими характеристиками Прикаспийского региона (рис. 9) наглядно демонстрирует, что при определенном соответствии зон с наибольшим снижением продуктив-

[28] Vital Caspian Graphics 2 – Opportunities, Aspirations and Challenges, 2012. GRID–Arendal. https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/: s_document/174/original/vg-caspian2.pdf?1484295216 (дата обращения 01.11.2023).

ности и наиболее аридных регионах (восточная и северо-восточная части Прикаспия), эта корреляция отмечается далеко не всегда. Хотя в целом тенденции, отмечаемые при исследовании показателей НБДЗ, хорошо соотносятся с перечисленными особенностями изменений климата. Прогнозируемое “сильное опустынивание” подтверждается установленными в ходе нашего исследования актуальными процессами снижения продуктивности и деградации земель на более обширных территориях в северо-восточной и восточной частях региона, в меньшей степени – на северо-западе и западе Прикаспия, и лишь отдельными небольшими участками – в южной части региона, где преобладают земли с повышением продуктивности, стабильные, или в крайнем случае – подверженные риску деградационных явлений. Несмотря на то, что ожидаемое, согласно прогнозным моделям, сильное повышение температуры, особенно в холодный сезон, сопровождается современными трендами деградации, актуальный потенциал продуктивности в этой части Прикаспия, описываемый через “уровень” продуктивности, достаточно высок, чтобы проектировать успешные мероприятия по адаптации.

Важно отметить, что улучшение продуктивности и заметное снижение доли деградированных земель характерно для южной части региона, отличающейся как раз наиболее высокими температурами, хотя относительно большее количество осадков явно способствует здесь повышенной адаптационной способности. Однако, и это обстоятельство не всегда прослеживается в должной мере, что мы связываем не столько с фактическим климатом или его изменениями, сколько с определенными мероприятиями по устойчивому землепользованию, внедрению эффективных почво- и водосберегающих технологий, по сохранению и восстановлению земель. Среди последних, хорошо фиксируемых с помощью индикаторов НБДЗ, доминируют практики и модели землепользования, направленные на увеличение лесистости горных склонов (лесовосстановление и лесоразведение), внедрение улучшенных земледельческих практик в иранской и азербайджанской части региона. В туркменской части адаптационные мероприятия, хорошо отражающиеся в положительных трендах продуктивности и стабилизации негативной динамики деградации пустынных пастбищ, связаны с одной стороны – с закреплением песков и солончаков в районе залива Туркменбаши, а с другой – с регулированием пастбищной нагрузки и мероприятиями по восстановлению отгонных пастбищ и пустынной растительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований находит подтверждение рабочая гипотеза о том, что достижение состояния нейтрального баланса деградации земель может служить критерием адаптации наземных экосистем к изменениям климата. Иначе говоря, территории, где за определенное время достигнут и поддерживается НБДЗ, могут быть с определенной степенью уверенности отнесены к тем, где реализован потенциал адаптации к климатическим изменениям.

Картографический анализ динамики продуктивности земель как наиболее информативного показателя достижения НБДЗ для Прикаспийского региона позволяет заключить, что для анализируемых территорий в пределах даже относительно короткого промежутка времени основным изменениям в продуктивности подвержены пастбищные системы, природные пустыни и пахотные земли. Основные тенденции в составе наземного покрова и его продуктивности, отражающих реакцию землепользователей на изменения природной среды и климата, направлены на преобразование травянистых систем (пастбищ) в пахотные земли, а природных пустынных сообществ – в пастбища. Интенсификация эксплуатации этих типов земель приводит к их усиленной деградации несмотря на то, что значительная их часть остается стабильной в отношении изменений природной среды и климата. Соответственно, адаптационный потенциал этих земель снижается и требует особого внимания для его поддержания и восстановления. Некоторая часть природных пустынь и пастбищ (при снижении антропогенной нагрузки и внедрении методов регулирования пастбищной нагрузки и управления пастбищами), а также пахотных земель (в случае применения приемов устойчивого землепользования с внедрением почво- и водосберегающих практик) испытывает тенденции к улучшению, однако их доля в регионе невелика. Лесопокрытые земли занимают значительную часть среди улучшенных земель (и более ни в одной из категорий), поэтому с уверенностью можно утверждать, что успешные практики лесопользования имеют в регионе приоритет и высокую эффективность в области адаптации.

Вместе с тем деградационные явления в целом для региона во многом сходны по проявлению. Поэтому крайне важным представляется разработать “модельные” сценарии отклика на изменения климата.

Для разработки таких адаптационных сценариев необходим анализ наиболее успешных практик и ситуаций. И в этом случае использование методологии НБДЗ может быть значительным подспорьем, позволяющим с помощью разных “субиндикаторов” продуктивности вы-

явить территории, потенциально адаптированные к ИК. Предварительная оценка, проведенная нами в настоящее время, показывает, что таких территорий на всем Прикаспии – не более 2%. Но они должны быть использованы для исследования наиболее приемлемых локальных моделей по адаптации. Среди последних очевидное доминирующее значение занимают модели по лесоразведению, в меньшей степени – земледельческие и пастбищные практики, которые требуют более глубокого анализа соответствующих моделей УЗП, а также практики сохранения естественных, преимущественно пустынных, ландшафтов. Территории с применением таких практик следует отличать от территорий, где степень деградации земель достигла максимальной степени и при формальном применении показателей НБДЗ, реагирующих на динамику состояния экосистем, сохраняется стабильной. Полагаем, что это направление требует особого внимания при дальнейшей разработке подходов к применению показателей НБДЗ для оценки адаптационной способности природных и природно-антропогенных систем к ИК.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института географии РАН FMWS-2022-0001.

FUNDING

This study was supported within topic FMWS-2022-0001 of a State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беляева М.В., Андреева О.В., Куст Г.С., Лобковский В.А. Опыт оценки динамики деградации земель юга Европейской части России с использованием методологии нейтрального баланса деградации земель // Экосистемы: экология и динамика. 2020. Т. 4. № 3. С. 145–165.

Беляева М.В., Куст Г.С., Андреева О.В. Оценка нейтрального баланса деградации земель Самарской области с помощью глобальных и региональных индикаторов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2023. № 3. С. 16–27. https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-16-27

Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. № 2. С. 207–217. https://doi.org/10.31857/S258755662002017X

Национальный докл. “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)”. М.: ООО “Изд-во МБА”, 2019. Т. 2. 476 с.

Национальный докл. “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” / ред. А.И. Бедрицкий. М.: ГЕОС, 2018. 357 с.

Природопользование и устойчивое развитие. Мировые экосистемы и проблемы России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 448 с.

Романовская А.А. Потребности и пути развития мониторинга адаптации // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29. № 1. С. 107–126.

Сапанов М.К. Влияние изменения климата на обводненность территории северного Прикаспия // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 5 (45). С. 25–30.

Семенов В.А., Черенкова Е.А. Оценка влияния атлантической мультидекадной осцилляции на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в Атлантическом секторе в летний сезон // ДАН. 2018. Т. 478. № 6. С. 697–701. https://doi.org/10.7868/S0869565218060178

Славко В.Д., Андреева О.В., Куст Г.С. Оценка динамики наземного покрова в целях установления нейтрального баланса деградации земель на локальном уровне (для опустыненных угодий сухостепного Заволжья) // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29. № 1 (94). С. 59–69.

Титкова Т.Б. Изменения климата полупустынь Прикаспия и Тургая в XX в. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2003. № 1. С. 106–112.

Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н. Мониторинг подверженных опустыниванию земель Республики Калмыкия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 130–141. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141

Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н. Современные тенденции изменений влажности почвы и испарения на юге Европейской России по спутниковым данным и данным реанализа: матер. 20-й Международ. конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2022. 460 с. https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a

Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Платова Т.В., Семенов В.А. Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на повторяемость сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины // Метеорология и гидрология. 2020. № 12. С. 5–19.

Черенкова Е.А., Сидорова М.В. Климатический сдвиг сезонных вариаций увлажнения в бассейне реки Урал в последние десятилетия // Проблемы региональной экологии. 2022. № 5. С. 93–98. https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-93-98

Akbari M., Baubekova A., Roozbahani A., Gafurov A., Shiklomanov A., Rasouli K., Ivkina N., Klöve B., Torabi Haghighi A. Vulnerability of the Caspian Sea shoreline to changes in hydrology and climate // Environmental Res. Let. 2020. Vol. 15. № 11. Art. 115002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaad8

Andreeva O.V., Kust G.S. Land Assessment in Russia Based on the Concept of Land Degradation Neutrality // Reg. Res. Russ. 2020. Vol. 10. № 4. P. 593–602. https://doi.org/10.1134/S2079970520040127

Andreeva O.V., Kust G.S., Lobkovsky V.A. Sustainable Land Management and Land Degradation Neutrality // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2022. Vol. 92. P. 285–296. https://doi.org/10.1134/S1019331622030066

Andreeva O.V., Lobkovsky V.A., Kust G.S., Zonn I.S. The Concept of Sustainable Land Management: Modern State, Models and Typology Development // Arid Ecosystems. 2021. Vol. 11. P. 1–10. https://doi.org/10.1134/S2079096121010029

Behzadi F., Yousefi H., Javadi S., Moridi A., Hashemy S., Mehdy S., Neshat A. Meteorological drought duration–severity and climate change impact in Iran // Theoretical and Applied Climatology. 2022. Vol. 149. P. 1297–1315. https://doi.org/10.1007/s00704–022–04113–5

Hu Yunfeng, Han Yu-ku, Zhang Yunzhi Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan // J. of Arid Environments. 2020. Vol. 180. Art. 104203. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104203

Javari M. Trend and Homogeneity Analysis of Precipitation in Iran // Climate. 2016. Vol. 4. № 3. Art. 44. https://doi.org/10.3390/cli4030044

Kust G., Andreeva O., Cowie A. Land Degradation Neutrality: Concept development, practical applications and assessment // J. of Environ. Management. 2017. Vol. 195. № 1. P. 16–24. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.043

Kust G., Andreeva O., Lobkovskiy V., Telnova N. Uncertainties and policy challenges in implementing Land Degradation Neutrality in Russia // Environ. Sci. & Policy. 2018. Vol. 89. P. 348–356. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.010

Kust G.S., Andreeva O.V., Shklyaeva D.S., Lobkovskiy V.A. Towards the possibilities of achieving the land degradation neutrality in the countries of the Caspian Region (on the example of Russia, Kazakhstan and Turkmenistan). Scientific Conference on Climate Change in the Caspian Sea Region. 2021. P. 273–276.

Kust G., Andreeva O., Shklyaeva D. Application of the Concept of Land Degradation Neutrality for Remote Monitoring of Agricultural Sustainability of Irrigated Areas in Uzbekistan // Sensors. 2023. Vol. 23. Art. 6419. https:// doi.org/10.3390/s23146419

Kuzucuoğlu C., Leroy S. Geographic and geomorphologic context of Caspian Sea level fluctuations over the Late Pleistocene and Holocene // Quaternaire. 2023. Vol. 34. № 2. P. 71–92.

Limareva N., Cabos N., William D., Izquierdo A., Sein D. The climate change of the Caucasus as a result of the global warming // Современная наука и инновации. 2017. № 2. *С.* 15–26.

Molavi-Arbshahi M., Arpe K., Leroy S. Precipitation and temperature of the southwest Caspian Sea region during the last 55 years: Their trends and teleconnections with large-scale atmospheric phenomena // Int. J. of Climatology. 2016. Vol. 36. P. 2156–2172. https:// doi.org/10.1002/joc.4483

Kust G.S., Andreeva O.V., Shklyaeva D.S., Lobkovskiy V.A. Towards the possibilities of achieving the land degradation neutrality in the countries of the Caspian Region (on the example of Russia, Kazakhstan and Turkmenistan). In Proc. of Sci. Conf. on Climate Change in the Caspian Sea Region, 27–28 October 2021. 2021. P. 273–276.

Orr B.J., Cowie A.L., Castillo Sanchez V.M., et al. Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany, 2017. 129 p.

Pearce-Higgins J.W., Antao L.H., Bates R.E., Bowgen K.M., Bradshaw C.D., Duffield S.J., et al. A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment // Ecological Indicators. 2022. Vol. 136. Art. 108690. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108690

Phillips L.B., Hansen A.J., Flather C.H. Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MODIS primary production // Remote Sens. of Environment. 2008. Vol. 112. № 12. P. 4381–4392.

Rabbaniha M. Assessment of climate change impacts on the Caspian Sea Iranian coastal wetlands, using by GIS. 2013. https://www.researchgate.net/publication/258216633_Assessment_of_climate_change_impacts_on_the_Caspian_Sea_Iranian_coastal_wetlands_using_by_GIS

Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections // Communications Earth & Environment. 2023. Vol. 4. Art. 357. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8

Sanz M.J., Vente J. de, Chotte J.-L., Bernoux M., Kust G., Ruiz I., Almagro M., Alloza J.-A., Vallejo R., Castillo V., Hebel A., Akhtar-Schuster M. Sustainable Land Management contribution to successful land-based climate change adaptation and mitigation. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany, 2017. 178 p.

Schiemann R., Lüthi D., Vidale P., Schär C. The precipitation climate of Central Asia – intercomparison of observational and numerical data sources in a remote semiarid region // Int. J. Climatol. 2008. Vol. 28. P. 295–314.

Sims N.C., Newnham G.J., England J.R., et al. Good Practice Guidance. SDG Indicator 15.3.1, Proportion of Land That Is Degraded Over Total Land Area. Ver. 2.0. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany, 2021. 148 p.

UN, 2015. United Nations. A/RES/70/1. General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. 35 p.

Vahdati K., Massah Bavani A.R., Khosh-Khui M., Fakour P., Sarikhani S. Applying the AOGCM-AR5 models to the assessments of land suitability for walnut cultivation in response to climate change: A case study of Iran // PLoS ONE. 2019. Vol. 14. № 6. Art. e0218725.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218725

Zhang W., Xiang F., Qin W., Jiang W. Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China // Ecological Indicators. 2020. Vol. 110. Art. 105892.
https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105892

Achieving Land Degradation Neutrality as an Integral Indicator of Land Ecosystems Adaptation to Climate Change in the Caspian Region

G. S. Kust[a], *, V. A. Lobkovskiy[a], O. V. Andreeva[a], and D. S. Shklyaeva[a]

[a]*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: kust@igras.ru*

Adaptation to climate change is one of the highest priorities on national and regional agendas. Various approaches are proposed to assess the effectiveness of adaptation measures: valuation of ecosystem services, changes in total carbon stocks, ecosystem and community-based adaptation, actual climate change indicators and others. Currently, there are no indicators of the effectiveness of climate change adaptation measures in either the regulatory framework or the national statistical system of Russia. None of the eight SDG target 13 indicators are developed in the Rosstat system. In this paper, we examine the possibility of using land degradation neutrality (LDN) as an integrated indicator to assess the adaptation of terrestrial ecosystems to climate change. We studied the territories of the administrative regions of the countries bordering the Caspian Sea, for which an analysis of LDN achievement was carried out in terms of indicators of land cover dynamics, land productivity dynamics and soil organic carbon stock dynamics. Land productivity dynamics play a leading role in the overall assessment of LDN for the Caspian region. The analysis of land transitions within the identified integral classes of productivity dynamics shows that the maintenance and change of adaptive potential and degradation risks within these classes is uneven. According to our calculations, the condition of land in a significant part of the Caspian region improved in 2016–2020 compared to the baseline period 2001–2015. In general, land productivity is relatively high during this period, confirming the high potential for adaptation to climate change in recent years. Intensified exploitation of pasture systems, natural deserts and croplands leads to their increased degradation, although a significant part of them remains stable in the face of current natural and climatic changes. Some natural deserts and rangelands (due to reduced anthropogenic pressure) and arable lands (due to the application of sustainable land management practices) are improving, but their share in the region is small. Forested areas account for a significant proportion of improved land, so it can be argued that successful forest management practices are a priority and have a high adaptive capacity in the Caspian region. The observed trends in land dynamics and productivity are in good agreement with recorded and projected climate changes in the Caspian region. This allows for a generally positive assessment of the experience of using the LDN approach in the Caspian region to assess adaptation to climate change.

Keywords: adaptation to climate change, sustainable land management, arid and semiarid areas, Caspian Sea region, land degradation, land degradation neutrality

REFERENCES

Akbari M., Baubekova A., Roozbahani A., Gafurov A., Shiklomanov A., Rasouli K., Ivkina N., Klöve B., Torabi Haghighi A. Vulnerability of the Caspian Sea shoreline to changes in hydrology and climate. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 15, no. 11, art. 115002. https://doi.org/10.1088/1748–9326/abaad8

Andreeva O.V., Kust G.S. Land assessment in Russia based on the concept of land degradation neutrality. *Reg. Res. Russ.*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 593–602. https://doi.org/10.1134/S2079970520040127

Andreeva O.V., Kust G.S., Lobkovsky V.A. Sustainable land management and land degradation neutrality. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2022, vol. 92, pp. 285–296. https://doi.org/10.1134/S1019331622030066

Andreeva O.V., Lobkovsky V.A., Kust G.S., Zonn I.S. The concept of sustainable land management: Modern state, models and typology development. *Arid Ecosys.*, 2021, vol. 11, pp. 1–10. https://doi.org/10.1134/S2079096121010029

Behzadi F., Yousefi H., Javadi S., Moridi A., Hashemy S., Mehdy S., Neshat A. Meteorological drought duration–severity and climate change impact in Iran. *Theor. Appl. Climatol.*, 2022, vol. 149, pp. 1297–1315. https://doi.org/10.1007/s00704-022-04113-5

Belyaeva M.V., Andreeva O.V., Kust G.S., Lobkovskiy V.A. Experience in assessment of land degradation dynamics of the south of European part of Russia using the methodology of Land Degradation Neutrality. *Ekosis.: Ekol. Dinamika*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 145–165. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/1993-3916-2021-10135

Belyaeva M.V., Kust G.S., Andreeva O.V. Assessment of the land degradation neutrality in the Samara region by global and regional indicators. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 17: Pochvoved.*, 2023, no. 3, pp. 16–27. (In Russ.). https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-16-27

Cherenkova E.A., Bardin M.Y., Platova T.V., Semenov V.A. Influence of North Atlantic SST Variability and Changes in Atmospheric Circulation on the Frequency of Summer Droughts in the East European Plain. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 819–829. https://doi.org/10.3103/S1068373920120018

Cherenkova E.A., Sidorova M.V. Climatic shift of seasonal variations in moisture in the Ural River basin in recent decades. *Probl. Reg. Ekol.*, 2022, no. 5, pp. 93–98. (In Russ.).

Hu Yu., Han Yu., Zhang Yu. Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan. *J. Arid Environ.*, 2020, vol. 180, art. 104203. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104203

Javari M. Trend and homogeneity analysis of precipitation in Iran. *Climate*, 2016, vol. 4, no. 3, art. 44. https://doi.org/10.3390/cli4030044

Kust G., Andreeva O., Cowie A. Land degradation neutrality: Concept development, practical applications and assessment. *J. Environ. Manage.*, 2017, vol. 195, no. 1, pp. 16–24. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.043

Kust G., Andreeva O., Lobkovskiy V., Telnova N. Uncertainties and policy challenges in implementing Land Degradation Neutrality in Russia. *Environ. Sci. Policy*, 2018, vol. 89, pp. 348–356. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.010

Kust G., Andreeva O., Shklyaeva D. Application of the concept of land degradation neutrality for remote monitoring of agricultural sustainability of irrigated areas in Uzbekistan. *Sensors*, 2023, vol. 23, art. 6419. https://doi.org/10.3390/s23146419

Kust G.S., Andreeva O.V., Shklyaeva D.S., Lobkovskiy V.A. Towards the possibilities of achieving the land degradation neutrality in the countries of the Caspian Region (on the example of Russia, Kazakhstan and Turkmenistan). In *Proc. of Sci. Conf. on Climate Change in the Caspian Sea Region, 27–28 October 2021*. 2021, pp. 273–276.

Kuzucuoğlu C., Leroy S. Geographic and geomorphologic context of Caspian Sea level fluctuations over the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternaire*, 2023, vol. 34, no. 2, pp. 71–92.

Limareva N., Cabos N., William D., Izquierdo A., Sein D. The climate change of the Caucasus as a result of the global warming. *Sovrem. Nauka Innov.*, 2017, no. 2, pp. 15–26. (In Russ.).

Molavi-Arbshahi M., Arpe K., Leroy S. Precipitation and temperature of the southwest Caspian Sea region during the last 55 years: Their trends and teleconnections with large-scale atmospheric phenomena. *Int. J. Climatol.*, 2016, vol. 36, pp. 2156–2172. https:// doi.org/10.1002/joc.4483

Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: otsenka riskov i ekologo-ekonomicheskikh posledstvii degradatsii zemel'. Adaptivnye sistemy i tekhnologii ratsional'nogo prirodopol'zovaniya (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)" [National Report "Global Climate and Soil Cover in Russia: Assessment of Risks and Environmental and Economic Consequences of Land Degradation. Adaptive Systems and Technologies for Rational Environmental Management (Agriculture and Forestry)"]. Moscow: GEOS Publ., 2018. 357 p.

Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)". T. 2 [National Report "Global Climate and Land Cover in Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructural, and Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry). Vol. 2]. Moscow: MBA Publ., 2019. 476 p.

Orr B.J., Cowie A.L., Castillo Sanchez V.M. et al. *Scientific conceptual framework for land degradation neutrality. A report of the science-policy interface*. Bonn: UN Convention to Combat Desertification (UNCCD), 2017. 129 p.

Pearce-Higgins J.W., Antao L.H., Bates R.E., Bowgen K.M., Bradshaw C.D., Duffield S.J. et al. A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment. *Ecol. Indic.*, 2022, vol. 136, art. 108690. http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108690

Phillips L.B., Hansen A.J., Flather C.H. Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MODIS primary production. *Remote Sens. Environ.*, 2008, vol. 112, no. 12, pp. 4381–4392.

Prirodopol'zovanie i ustoichivoe razvitie. Mirovye ekosistemy i problemy Rossii [Environmental Management and Sustainable Development. World Ecosystems and Problems of Russia]. Moscow: KMK Publ., 2006. 448 p.

Rabbaniha M. *Assessment of climate change impacts on the Caspian Sea Iranian coastal wetlands, using by GIS*. 2013.

Romanovskaya A.A. Needs and development paths for adaptation monitoring. *Probl. Ekol. Monitor. Modelir. Ekosis.*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 107–126. (In Russ.).

Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. *Commun. Earth Environ.*, 2023, vol. 4, art. 357. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8

Sanz M.J., Vente J. de, Chotte J.-L., Bernoux M., Kust G., Ruiz I., Almagro M., Alloza J.-A., Vallejo R., Castillo V., Hebel A., Akhtar-Schuster M. *Sustainable Land Management contribution to successful land-based climate change adaptation and mitigation. A Report of the Science-Policy Interface*. Bonn: UN Convention to Combat Desertification (UNCCD), 2017. 178 p.

Sapanov M.K. Impact of climate change on water content in the northern Caspian region. *Arid Ekosys.*, 2010, vol. 16, no. 5, pp. 25–30. (In Russ.).

Schiemann R., Lüthi D., Vidale P., Schär C. The precipitation climate of Central Asia – intercomparison of observational and numerical data sources in a remote semiarid region. *Int. J. Climatol.*, 2008, vol. 28, pp. 295–314.

Semenov V.A., Cherenkova E.A. Evaluation of the Atlantic Multidecadal Oscillation Impact on Large-Scale Atmospheric Circulation in the Atlantic Region in Summer. *Dokl. Earth Sci.*, 2018, vol. 478, pp. 263–267. https://doi.org/10.1134/S1028334X18020290

Sims N.C., Newnham G.J., England J.R., et al. *Good Practice Guidance. SDG Indicator 15.3.1, Proportion of Land That Is Degraded Over Total Land Area. Version 2.0*. Bonn: UN Convention to Combat Desertification (UNCCD), 2021. 148 p.

Slavko V.D., Andreeva O.V., Kust G.S. Assessment of land cover dynamics in order to establish a neutral balance of land degradation at the local level (for decertified lands of the dry steppe Trans-Volga region). *Arid Ekosys.*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 59–69. (In Russ.).

Titkova T.B. Climate changes in the Caspian and Turgai semi-deserts in the 20th century. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2003, no. 1, pp. 106–112. (In Russ.).

Titkova T.B., Cherenkova E.A., Zolotokrylin A.N. Current trends in changes in soil moisture and evaporation in the south of European Russia based on satellite data and reanalysis data. In *Materialy 20-i Mezhdun. Konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* [Proc. of the 20th Int. Conf. "Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space"]. Moscow: IKI RAN, 2022, p. 460. (In Russ.). https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a

Titkova T.B., Zolotokrylin A.N. Monitoring of lands affected by desertification in the Republic of Kalmykia. *Sovrem. Probl. Distants. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 130–141. (In Russ.). https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141

UN, 2015. *United Nations. A/RES/70/1. General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. 2015. 35 p.

Vahdati K., Massah Bavani A.R., Khosh-Khui M., Fakour P., Sarikhani S. Applying the AOGCM-AR5 models to the assessments of land suitability for walnut cultivation in response to climate change: A case study of Iran. *PLoS ONE*, 2019, vol. 14, no. 6, art. e0218725. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218725

Zhang W., Xiang F., Qin W., Jiang W. Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China. *Ecol. Indic.*, 2020, vol. 110, art. 105892. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105892

Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of drylands in the European part of Russia: Secular trends and links to droughts. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 207–217. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S258755662002017X